

小規模な音楽スタジオの音場における低周波モードの可視化

森 太郎

1. はじめに

ホールに代表される演奏空間では、外からの騒音の遮断、他室間との遮音のほか、最適な残響時間¹などの音響パラメータの調整などが設計時から問題となる。それらが演奏に少なからず影響を与えるからである。小規模なスタジオなどではこれに加え、定在波²の影響が無視できない。周波数軸上で離散的に存在する低次の固有モードの周波数が、演奏で使用する音域に分布し、空間が不均一な共鳴器として作用するためである³。本稿は比較的小さな演奏空間における定在波の測定について述べ、器楽や声楽などの演奏・録音を行う音場を可視化し、演奏位置と聴取・録音位置の関係が音質に与える影響を視覚的に表すことを目的とする。

楽器音や音声などの解析を行う場合、一般に無響室などを用いて録音を行うのが普通である。

これは音源の性質と音場の影響を完全に分離するためである⁴。音楽の場合、無響室で収録した音をドライソースとして、別の音場のインパルス応答を畳み込めば⁵、後者で録音した音と原理的には同じことになり、また雑音の影響も無いため便利のように考えられるが⁶、この方法は適当ではない。これは、器楽や声楽の演奏では音場による音の変化も重要な要素であり、反射音を聞いて演奏にフィードバックしながら行われていると考えられているからである⁷。そこで生演奏の収録には、無響室ではなく専用の録音スタジオなどが用いられる。この際、演奏者とマイクロフォンの位置は一般に異なり⁸、そのために演奏者の意図したものと異なる収録が行われることがある⁹。録音の場合、演奏者の耳の位置からマイクロフォンの位置の伝達関数で補正をすることは技術的に可能であるが、直接聴取の場合これは難しい。一般に複数の場所に配置された聴衆の位置によって伝達関数が異なるからである。

これらの理由から、演奏・録音をスタジオなどで行う場合、その音場の性質がわかっていることが不可欠である。特に楽器を置く位置や、聴取・収録を行う位置により、低い周波数の定在波の影響が大きくなることが考えられる。これを可視化して示すことは、実際の演奏や収録を行う場合に極めて有効な指標となると考えられる。楽器やマイクロフォンの設置位置を決める参考となるからである。本稿では、モーダル解析とよばれる方法を用い、位置と周波数によって異なる音場の性質を、簡単に可視化する例を示す。

註

¹ 音場の強さがはじめの 10^{-6} 倍に減っていくまでの時間として定義される。

² 入射波と反射波が干渉して場所によって半波長周期で音圧の振幅が生じる現象。

³ 大規模なホールの設計では、演奏に使用される音に比べて離散的に存在する低次の固有周波数が低く、定在波の影響は事実上無視されている。

⁴ たとえば楽器音の解析では、その仕組みを知ることや改良を目的とするために、音を録音する場合に楽器による影響とそれ以外の因子による影響を厳格に区別する必要がある。

⁵ 時間軸上での畳み込み。周波数軸上ではホールの性質を現す伝達関数の乗算になる。

⁶ コンピュータミュージックなどでは、実際に使用されている方法である。ある演奏空間のインパルス応答を、コンピュータを用いて作成したドライソースに畳み込み、音場の影響を後から付け加えるのである。コンピュータミュージックのように、出力された音からのフィードバックの無い演奏では、有効な方法である。

⁷ ロックなどのコンサートで演奏者用のモニタースピーカが必須であるのも、これに起因する。また、無響室での演奏に違和感を持つことがあるのも同じ理由である。

⁸ 演奏者の意図する音を確実に録音したい場合や、演奏者の位置での収録音と比較したい場合など、いわゆるヘッドマイクروفオンを用いることがある。文献[1] 第5章にヘッドマイクروفオンを用いてピアノの演奏音を演奏者の位置で録音し、主観実験に用いた例がある。

⁹ カラヤン(von Karajan, Herbert, 1908-1989)は音の収録にこだわり、最終編集段階まで立ち会っていたと言われている。

2. 室内の定在波

反射壁でかこまれた音場は、固有振動モードを持っており演奏に影響を及ぼす。音楽家なら誰でも、楽器は異なった部屋では異なった音を出すことを知っていて、たとえば天井が1m 高いだけで、まったく異なった楽器で演奏されたように聞こえることがある。一方、部屋が同じでも楽器の位置、すなわち部屋の中央か隅か、あるいは低い位置か高い位置かによっても音は変化し、特定の周波数帯域に属する音が強調され、あるいは逆に小さくなる。また、音色は楽器を置く(持つ)向きにも大きく依存する。これは部屋の中の空気が持つ固有振動など、演奏空間の音場の影響によるものであり、特に用いられる音域に対して演奏空間の容積が比較的小さい場合には影響が顕著に現れる傾向がある。

固有振動モードにおける周波数では部屋の内部に振動の腹や節ができる。この固有振動の数は無数にあり、大きな部屋ほど最低次固有振動モードの周波数は小さい。また、空間の大きさに対して十分短い波長、すなわち高い音の周波数では、固有振動モードは周波数軸上で十分に密になり、同じ音域での音のばらつきには結びつかない。一方、空間の大きさに比べて波長が比較的に長い波、すなわち低い周波数の音波に関しては、定在波の影響が無視できないと考えられる。その場合には、空間の固有振動モードが楽器音の放射に影響を及ぼし、定在波の節、腹と楽器、聴取者、マイクروفオンの相対的な位置が大きな意味を持つようになる。空間の容積が大きくなるほど固有振動モードが周波数軸上で密になる値も小さいので、大ホールなどの大規模な空間の音響設計では問題とされないことが多く、通常、定在波の影響は考慮されていない。

一般的な録音スタジオは、近似的に直方体をしていることが多く、響きを考えて内壁に加工をしている。縦 l_x m、横 l_y m、高さ l_z mの直方体の空間の固有周波数は、壁面などの境界面上でそれに垂直な粒子速度が0という条件のもとで次の式で与えられる¹⁰。

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (1)$$

ここで、 c は音速であり、 n_x, n_y, n_z は0または正の整数である¹¹。 l_x, l_y, l_z の最大のものが l_x であれば空間の最低固有周波数は $n_x=1, n_y=0, n_z=0$ の場合になり(1-0-0モードと略記。以下同様)、その大きさは $c/(2l_x)$ である。たとえ

ば l_x が10mであれば約17Hzとなる。この式から、固有振動は周波数空間上で離散的に存在し、大きな空間ほど(すなわち辺の長さ l_x 、 l_y 、 l_z が大きいほど)低い周波数の固有振動を持つことがわかる。

一方、対象となる空間の全容量を $V\text{m}^3$ とすると、 $f\text{Hz}$ 以下の固有振動の数 N は近似式

$$N \approx \frac{4}{3} \pi V \frac{f^3}{c^3} \quad (2)$$

で与えられる¹²。本研究では室内の低在波が音楽の演奏に対する影響を考察することを目的としているので、周波数は対数軸にする方が扱いやすい。音符の表す音高に対応する周波数は、対数的に割振られているからである。たとえば現代の鍵盤楽器で主に使用される平均律は、半音の周波数の比が一定となるような音律、すなわち対数軸で等間隔に配置されている音律であり、この関係は音域が異なっても変わらない¹³。ここで基準となる周波数 $f_0\text{Hz}$ からのセント差¹⁴を x とすると、

$$f = f_0 \exp\left(\frac{\ln 2}{1200} x\right) \quad (3)$$

であるから

$$N \approx \frac{4}{3} \pi V \frac{f_0^3}{c^3} \exp\left(\frac{3 \ln 2}{1200} x\right) \quad (4)$$

となることがわかる。従って1セントごとの固有モードの数は

$$\frac{dN}{dx} \approx \frac{\ln 2}{300} \pi V \frac{f_0^3}{c^3} \exp\left(\frac{\ln 2}{400} x\right) \quad (5)$$

となり¹⁵、たとえば 400m^3 程度のスタジオでは、ピアノの最低音にあたる A_2 音の付近で半音(100cent)あたり約0.15個、3オクターブ上の a 音付近で約1個になる。実際の計算では、 f_0 にはピアノの最低音 A_2 の周波数27.5Hz、または国際標準ピッチの $a^1=440\text{Hz}$ を用いるのがわかり易い。

図1はそれぞれ $V=1000\text{m}^3$ 、 400m^3 、 100m^3 の容積を持つ空間における、各音域での半音あたりのモード数を示している。横軸の A_2 、 A_1 は、それぞれ下2点 A 音、下1点 A 音を表している。一番小さい 100m^3 の空間では、 a 音付近でさえ4半音(長3度)にひとつの割合でしか固有振動が存在せず、広い範囲にわたって演奏空間の固有振動の定在波による音のばらつきが生じる。狭い練習室やレッスン室などで演奏する場合がこれにあたる。一方 1000m^3 の空間では、固有振動が下一点オクターブ付近ですでに半音にひとつの割合に達する。このことからわかるように、大きなホールの音響設計などでは定在波は問題とならないことが多く、後述するように、一般に音の波動性を無視した方

法でシミュレーションが行われている。本論文で測定したスタジオはほぼ 400m^3 の容積を持ち、録音スタジオとしてはかなり大きい部類に属し、モードの密度は大オクターブの最高音付近ではほぼ半音にひとつの割合に達する。一般に使用される録音スタジオは、その半分以下の容積のものも珍しくない。

たとえばピアノの場合、響板の基本固有周波数は大きさに応じて $60\text{Hz} \sim 150\text{Hz}$ ほどであり、これは B_1 音～ d 音に相当する。個体差もあるが、大きなピアノほど響板の基本固有周波数は小さい。フルコンサートグランドピアノで 60Hz 程度であり、高さ 1.1m のスタジオアップライトピアノで 130Hz ほどである¹⁶。一般に響板系の最低固有振動数より低い周波数では音の放射はほとんど無いが¹⁷、測定したスタジオの大きさでは、特に響板の基本固有振動の小さい、響板の大きなピアノで音場の定在波が問題となる。アップライトピアノでは、響板系と支柱との連成振動により、さらに低い周波数の音を放射することも観察されている¹⁸。また、音楽大学に設置される練習用のパイプオルガンなどでは、放射される音の音域が部屋の基本固有周波数を大きく下回ることも十分考えられる。容積のより小さなスタジオでは、固有振動の定在波の影響は更に大きくなる。

更に、近似式(2)は l_x 、 l_y 、 l_z が大きく異なり、または低い周波数の時には成り立たず、小さな練習室のように縦横の長さの比が大きくことなる直方体の空間では、式(1)で表される周波数軸上で離散的に存在する固有モードの影響が相対的に大きく現れると考えられる。

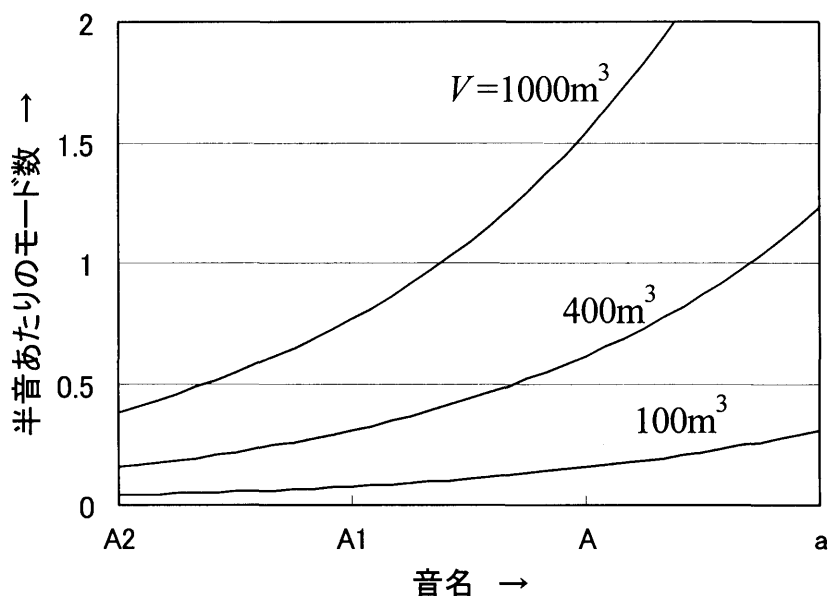


図 1 半音あたりのモード数 (計算値)

註

¹⁰ 壁面上でそれに垂直な粒子速度が 0 という条件は、一般の録音スタジオでは成り立たない。しかし一次近似として十分であることは、次節の実験値と計算値の一致から明らかである。

¹¹ たとえば、文献[2]などを参照。

¹² この近似式は、 f が部屋の大きさに比べて十分に大きな範囲で成り立ち、低い周波数では部屋の形の影響が大きくなるが、概ねの傾向を知ることができる。たとえば、文献[2]などを参照。

¹³ 古典音律や現代音楽で試みられる音律など、他の全ての音律でも同様。半音の間隔は不均一に割振られているが、異なったオクターブの同じ音程は対数

軸上で一定になる。

¹⁴ 平均律の半音音程の $1/100$ の音程が 1 セントである。従って 1 オクターブは 1200 セントになる。ほかの音程と同様に、周波数軸で対数的に定義されている。

¹⁵ N は離散値であるから、ここでは近似式(4)の右辺を微分したものを表しているものとする。

¹⁶ 詳しくは文献[1]第 4 章 1 節を参照。

¹⁷ 文献[1]第 4 章 1 節を参照。

¹⁸ 文献[1]第 4 章 1 節を参照。

3. モーダル解析による低周波モードの可視化の実験

ここでは、図 2 に示す音楽スタジオで低周波モードの可視化を試みた例を示す。このスタジオは音楽収録用に設計されており、定在波になるべくなくなるように平行壁を避け¹⁹、壁面や天井面に突起物を設けるなどではあるが、全体として縦 8.4 m (l_x) × 横 9.7 m (l_y) × 高さ 4.8 m (l_z) の直方体に近い。容積は突起物を含めて約 391 m^3 である。一方向の壁面が緩やかに傾斜している。図 3 に示すように、一方の壁には木材で凹凸の段差を設けてあり、共鳴効果を期待して中は空洞になっている。また天井には四角錐型の突起が多数設置されている。いずれも音響効果を考えた工夫である。また、木材を配していない壁面は、開口部（外窓）も含めて演奏時には床から天井まで達するカーテンで覆われている。ただし今回の実験は、図 3 のようにカーテンを取り除いて行っている。これは、部屋そのものの持つ性質を測定するためである²⁰。

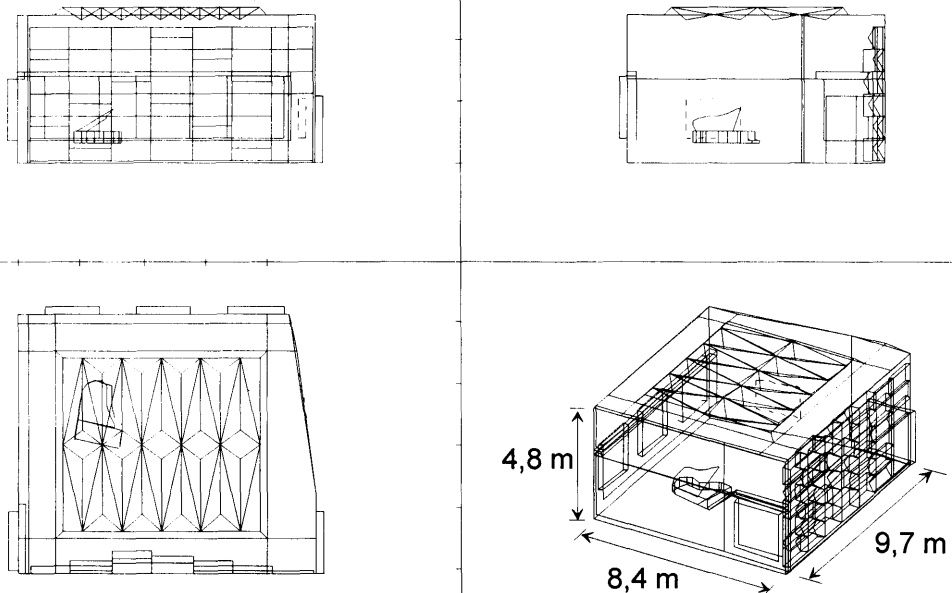


図 2 実験に用いた音楽スタジオ（第一角法による作図と、鳥瞰図）

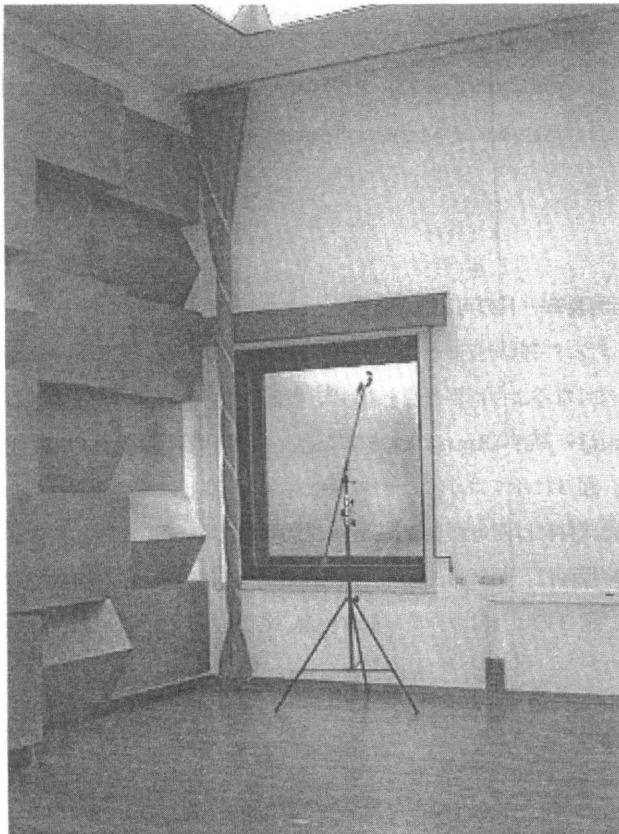


図 3 実験に用いた音楽スタジオ（壁面、床面の写真）

前述のように、波動性の無視できない、扱う波長に比べて小規模な音場では、音場そのものの持つ固有振動モードによる影響が問題となる。実際の空間の場合には、壁が少なからず音を吸収するので、純粋な意味での定在波はありえない²¹。音楽スタジオでは、壁面、床面、および天井面に工夫をして共鳴器や吸音設備を備えているために、事情はさらに複雑となる。また固有周波数が近接していると、あるいは各方向の固有周波数が一致していると、それぞれの腹と節が打ち消しあうこともある。これを計算によって求めるのは、現代の計算機の数でも非力であり、波動性を考慮したシミュレーションはごく小規模な空間に限定される²²。また、設置された共鳴器などの影響もあり、対象とする振動数により異なる境界条件を理論的に予測することは難しい。そこで、実際に演奏が行われる音場を測定し、直接的に特性を求めることが必要になる。

ここでは音場空間の動特性を知るために、スピーカによる外力を加えてその応答を音場内の複数の点で測定し、実験的同定を行う。本論文ではこの位置と周波数に依存する振る舞いを、実験モード解析法を用いて可視化する。実験モード解析法では、複雑な対象物上にいくつかの点を選んで多自由度系でモデル化し、固有周波数、減衰、振動形態を求める²³。これらは加振点から各代表点への伝達関数から求められ、結果からは、任意の入力に対する振動体の振る舞いが計算できる。この方法は実験が容易で精度が確保しやすく、振動現象の各パラメータを直接求めることができるという利点がある。

ここでは、2チャンネルFFTアナライザを用いて作成した広帯域のスweep入力波を用いて演奏スタジオの隅に置いたスピーカを発振させる一方、格子状に区切られたスタジオ内の小区間の頂点にあたる位置で音圧を記録し、伝達関数を計算した。この実験で得られた伝達関数と、理論上で得られる伝達関数ができる限り一致するようにカーブフィッティングによってモードパラメータを求め、振動特性マトリックスを求めた。これにより、互いに連成する線形素子からなるとした理論モデルのモードパラメータを、実験的に得たことになる。さらに、得られた振動特性マトリックスを用いて、固有振動モードの周波数、減衰、振動形態を求め、視覚化を行った²⁴。得られるのは周波数と位置に依存する振動形状である。

図2および図3で表した音楽用録音スタジオの定在波を可視化した例を図4に示す。3次元に広がる音場の様子を、演奏の参考になるように可視化するには、工夫が必要である。ここでは対象とする空間内に仮想的に配置したいいくつかの平面上での音場の様子を示す。図は27.5Hzにおける、1-1-0モードでの音場の様子である。これはピアノの最低音 A_2 の基本周波数に相当する。節の位置を考え、二つの壁面と床面上の様子を示している。白く表示された位置に腹があり、暗く表示されている部分には節がある。床面中央に十字に黒い帯が見られ、 x 軸、 y 軸方向にそれぞれ明確に節が現れている。また、 z 軸方向には節がない様子が見られる。このとき部屋の4隅には振動の腹が存在しており、上下方向には特異な点はないことがわかる。床面の近くにおける節と腹での伝達関数の実測値の最大差は、34dBであった。

この周波数を持つ音源があるとき、それを部屋の隅に置くか中央に置くかによって、音量と減衰時間に大きな影響を及ぼすことになる。腹の位置に音源があるときにこの周波数の音は共鳴して良く増幅され、しかしエネルギーを速く消費するために（定常音ではなく）減衰音であれば、その減衰率が大きくなることになる。つまり楽器のように調和な部分音構成を持つ音では、各部分音のバランスが変化し、音色が大きく変わることになる。

ピアノの響板の固有周波数は最低音を担当する弦の最低固有周波数にくらべて相当高く、従って実際のピアノから放射される最低音には基音はほとんど含まれていないと考えてよい²⁵。響板の固有振動数以下の周波数では、そのインピーダンスが大きいために弦の振動が有効に変換されないからである。さらに、ピアノでは弦の持つ非調和性などいくつかの理由で、国際標準ピッチ440Hzの4オクターブ下の音である27.5Hz ($=440 \cdot 2^{-4}$)より数10セント低く調律されるので、実験に用いたスタジオではこのモードがピアノの音色に影響することは考えられない。しかし、たとえば x 方向の長さがこの半分のときには、部屋の基本固有モードの周波数が、大きなピアノの響板の固有周波数を上回り、音色に影響を及ぼすことになる。さらに前章で述べたように、モードの密度が十分に大きくなって隣接音間でばらつきが生じなくなるのはさらに高音域であり、小さな音場ではこのような離散的に存在する振動モードの影響を無視することができないのがわかる。

実験に用いた録音スタジオのように、一般に音楽のための小規模な演奏空間では、定在波やフラッターエコーの影響を少なくするためさまざまな工夫がなされているのが普通である。たとえば壁面や天井面に、突起物や共鳴器などを設置し、壁を傾けて平行面を避け、あるいは吸音材を用いるなどである。しかし、上記の実験結果から、このスタジオにおいては、低い音域ではほぼ直方体の音場と同じ振る舞いをしていることがわかる。もちろん、このような工夫をせずに直方体のままだと、高音域にわたって定常波が乱れることなく存在するので、これらの工夫が有効であることは言うまでも無い。

また、立方体に近いなど、縦、横、高さの長さの比が適当でない場合には、周波数軸上での固有振動モードの離散化の傾向はさらに大きくなると考えられる。

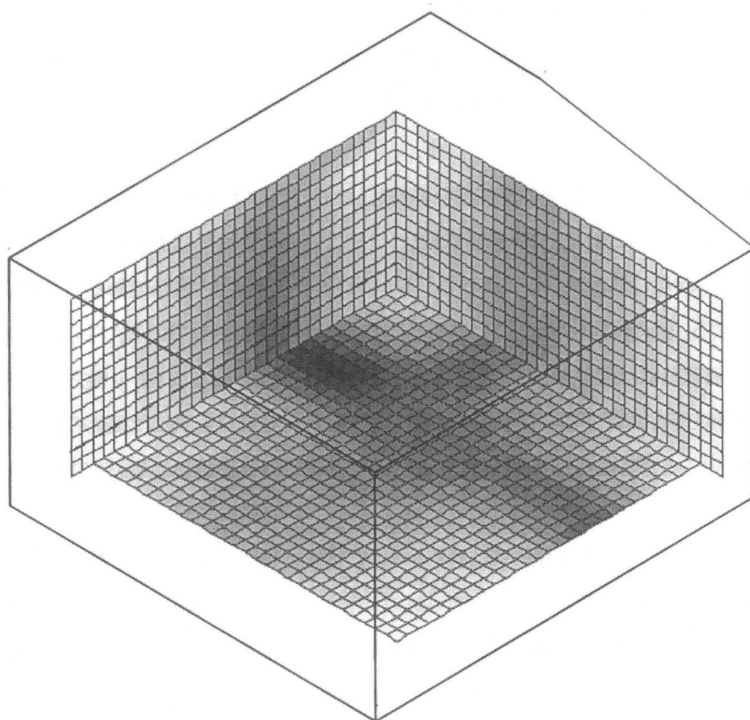
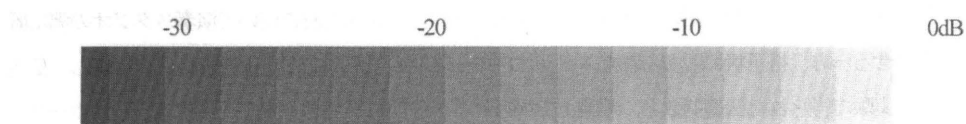


図 4 モード解析により可視化した音楽スタジオの定在波 (1-1-0 モード、27.5Hz)

三次元に広がる音場を視覚的に捕らえるには、上述のように音場を区切る有限個の平面上の濃淡で表すとわかりやすく、全体の様子が同時にわかる。一方、演奏者やマイクロフォンの位置を正確に定めるためには、平面図に投影した方が有利である。楽器の位置は、その大きさや演奏される状態によって制限されるからである。一般に上下方向の自由度が限られていることが多い²⁶。また、聴取者の位置もその両耳の高さによって制限を受ける。

図 5 は、図 4 で表した定在波を床から 120cm の位置での等高線で表したものである。この高さは、グランドピアノの躯体、および椅子に座った聴取者の耳の位置に相当する。また、室内楽などでも、ほぼこの高さが音源になる楽器は多い。したがって図 5 は、音場の様子をこれらの音源と聴取者を含む平面で表したことになる。図 4 と同様、濃い色は節の位置を表している。図 4 に比べて z 軸方向の情報は含まれていないが、水平面での正確な位置情報を得ることができ、楽器や聴取者などの位置を決めるには有利である。また、図 6 は、同じ平面で測定した 0-2-0 モード (35.0Hz) での様子を示している。このとき y 軸方向 (図中の上下方向) には大きな変化はないが、 x 軸 (同左右方向) 方向には節と腹が存在し、音源、聴取点の位置に注意を要する様子がわかる。

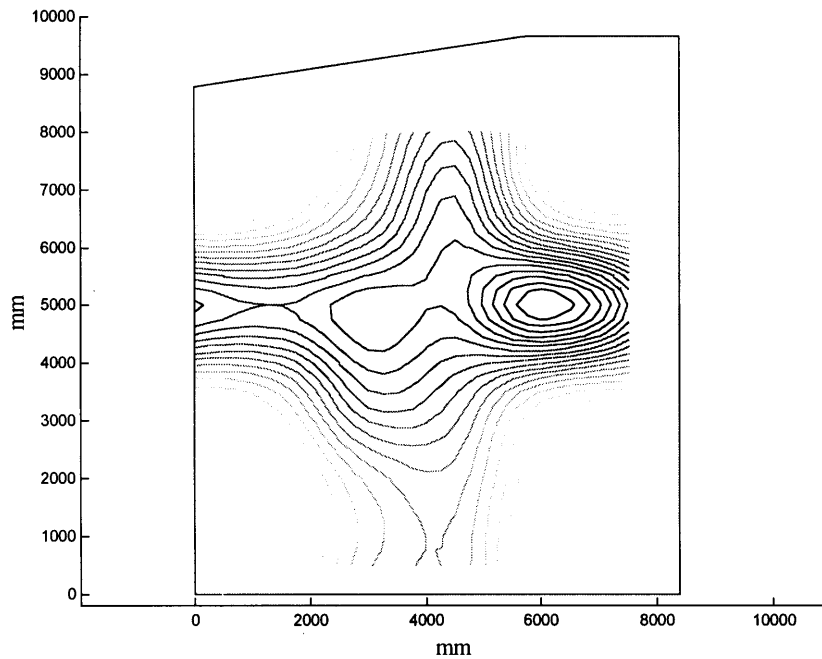


図 5 等高線で表した音楽スタジオの定在波 (1-1-0 モード、27.5Hz)

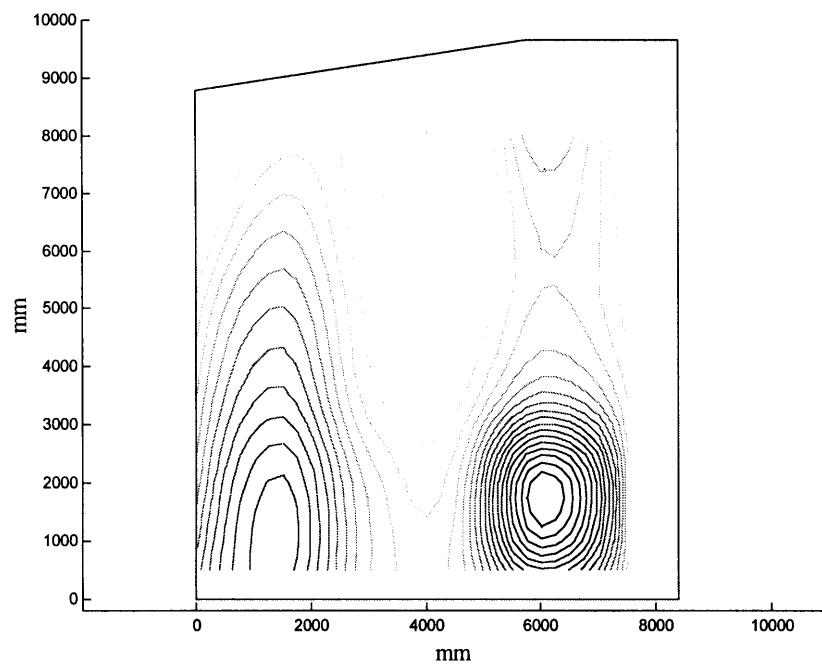


図 6 等高線で表した音楽スタジオの定在波 (0-2-0 モード、35.0Hz)

ピアノの響板と聴衆の耳のように、音源と聴取点がほぼ同じ高さの平面上にある場合には平面図だけで考えることができるが、そうでない場合は、各点を含む平面を考えることになる。たとえば楽器音の録音や拡声のためにマイクロフォンを天井面から取り付ける場合などがこれにあたる。前述の例では、 z 軸の方向に節が存在しないために無視できたが、図 7 に示す 0-0-1 モード (32.5Hz) のような場合には注意を要する。このとき、 x 軸方向および y 軸方向には大きな変化は見られないが、 z 軸の方向には節が存在するために、周波数によってはマイクロフォンを取り付ける位置に影響を及ぼすことになる。

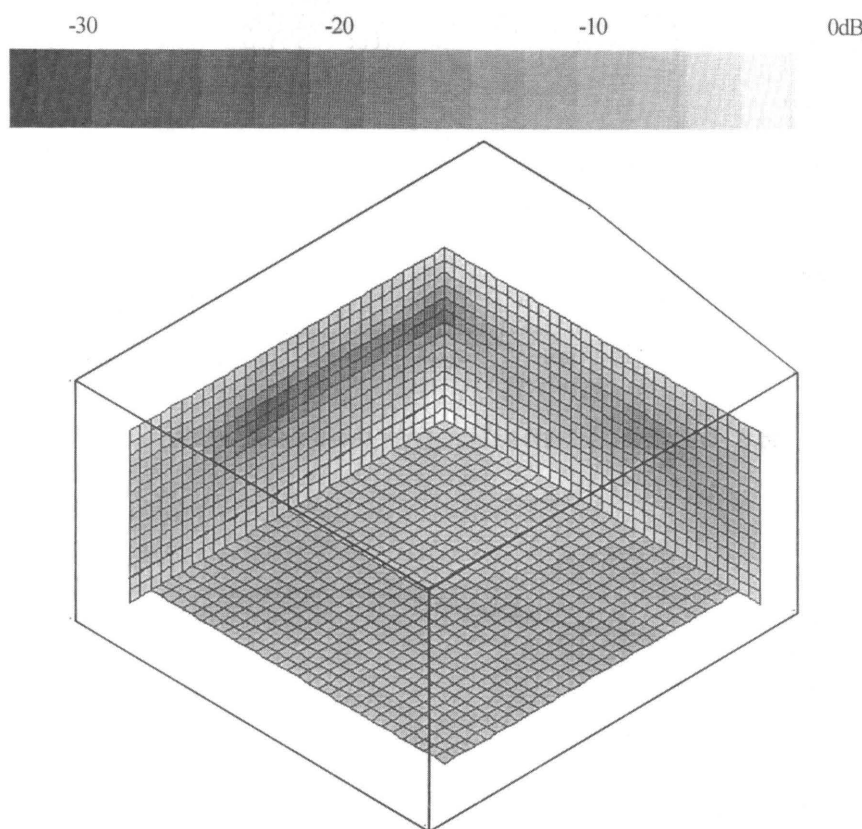


図 7 モード解析により可視化した音楽スタジオの定在波 (0-0-1 モード、32.5Hz)

スタジオを直方体と考えたとき、固有周波数は式(1)より簡単に計算できる。図 8 では計算値と実験値を比較した結果を示す。それらは極めてよく一致しているように見える。たとえばこのスタジオの基本固有モードである 0-1-0 モードでは、両者の誤差は約 6%に過ぎない。しかし、この差は音程に直すと約半音にあたり²⁷⁾、演奏空間の解析では無視できない量である。このモードは人間の最低可聴域の臨界に相当し、演奏には影響ないが、小規模な録音スタジオなどもっと小さな演奏空間ではこの値は楽器の放射する最低周波数を上回るので問題となり、本稿の実験モード解析による可視化が有効である。

モード番号 (n_x, n_y, n_z)	計算値 f/Hz	実験値 f/Hz
0-1-0	17,7	18,8
1-0-0	20,5	22,5
1-1-0	27,1	27,5
0-0-1	35,8	32,5
0-2-0	35,5	35,0

図 8 録音スタジオの固有周波数の計算値と実験値

註

¹⁹ 平行壁があると、フラッターエコー（鳴き竜現象）を生じやすい。

²⁰ カーテンや絨毯は、簡単に取り替えることができるので、それらを含めて測定を行うことに必然性はない。

²¹ 反射係数 1 となれば、最大音圧と最小音圧は無限大に近くなる。

²² たとえば、自動車内の音場など定在波の影響の大きな場合は波動性が考慮される。

²³ たとえば、文献[3]を参照。

²⁴ 特性マトリクスがえられていれば、これらは簡単に求められる。たとえば固有振動数はマトリクスの固有値問題に還元することができる。

²⁵ 文献[1]第 4 章第 1 節を参照。

²⁶ 大型の楽器は音源の高さが不変であることが多い。たとえばピアノでは床から響板の高さがそれにあたる。小型の楽器では、演奏者によって異なることが多いが、座って、あるいは立って演奏したときの位置という離散的な値しかとれない。

²⁷ $1200 \cdot \log_2(18.8/17.7) = 104$

4. 考察

実際の演奏は、楽器の音域に比べてつねに十分な容積を持った空間で行われるとは限らない。たとえば、本学マルチメディア A 棟には、間口約 1.2m、奥行き約 1.8m、高さ 2.4m の音楽練習室が設けられており、高さ 130cm ほどのアップライトピアノが置かれている。この部屋における各方向の基本固有周波数は式(1)から約 141Hz、94Hz、70Hz となる。響板の基本固有振動数と部屋の固有振動数がほぼ同じ音域である。また、一般にアップライトピアノは壁につけて設置されることから、音場の固有振動を励起しやすい。室内音場の定常波が存在してモードが励起されると、共振して音は大きくなるが、エネルギーを早く消費するために減衰が速くなる。楽器の発音周波数から考えてモードが十分に密に存在するために波動性を事実上無視できる、大規模なスタジオと、モードが密に存在せず、しかもちょうど弦の固有振動と同じ周波数の定常波を持つ可能性のある小さな音楽練習室では取り扱いが異なるのは当然のことであり、可視化の重要性は増す。

演奏空間に求められるのは、「良い音」の実現である。そのために、外部の騒音が室内に聞こえないことと、室内の響きが良いことが求められる。前者は物理的なパラメータと直接対応するので考えやすいが²⁸、後者はそれが主観的な量である以上、一意には決定できないのは明らかである。しかし良い音場が現実存在するとき、その物理パラメータを調べ、理論モデルと比べることにより物理量と主観量の関係が明らかになれば、新しい音場設計に活かすことができる²⁹。

大規模な音楽ホール設計ですでにこの方法で多くの成果を得ている³⁰。近年の大規模な音楽ホールでは、設計段

階で音場について十分考慮され、シミュレーションが行われている。しかしそれは波動性を無視してエネルギーの伝播を幾何学的に扱う音線法などによることが多い。これは波動性を考慮した有限要素法などの手法では計算量が問題となり、また音楽で取り扱う波長に比べて空間が十分に大きいために波動性は無視できると考えられているからである。高音域では多数のモードが密集し、各々を分離してとらえることは無意味であり³¹、マクロ的に捕らえる残響時間などが指標にされる³²。

一方、小規模な音場では、空間が音楽で扱う波長に対して小さく、波動性を無視できない³³。このような波動性を無視できない空間で演奏や録音を行う場合、本稿で述べた方法などにより音場を可視化し、マイクロフォンの位置などを決定することが有意義である。特に低次のモードが楽器の最低発音周波数を上回ったり近接したりしている場合の演奏・録音には注意が必要であると考えられる。

註

²⁸ 外部の遮断した空間は、必然的に空調設備などの騒音源を室内に持ち込むことを意味する。したがって、それらの騒音問題も考えなければならないのは当然である。

²⁹ 文献[5]で音楽ホールの主観評価について現在の研究成果がレビューされている。

³⁰ ホールはその形状から大きく3つに分類できる。平面図がほぼ長方形のシューボックス型、扇状のメガホン型、それに最も歴史の浅いアリーナ型である。1781年に建築された世界最古の音楽ホールであるライプツィヒ旧ゲヴァントハウスホールは400人収容のシューボックス型であった。現代の代表的なホールにシューボックス型のムジークフェラインザール（ウィーン）、メガホン型のミュンヘン・フィルハーモニーホール、アリーナ型のベルリン・フィルハーモニーなどがある。東京のサントリーホールもアリーナ型になる。これら複雑な形の音場空間を可視化、あるいは設計の段階でシミュレートするために、従来から模型などが用いられてきたが、現在ではコンピュータによるシミュレーションが不可欠になっている。

³¹ 高音域で過密にモードが存在するとき、ある周波数における音圧は各々の共振の和となる。位相を考慮すると温湿度などによる音響定数への影響が大きくなり、確率過程としてとらえる方が理にかなっている。

³² 残響時間は、部屋の容積、壁の吸音率と明確な関係にあり、制御しやすい。また、音線法などによるコンピュータシミュレーションも数多く行われ、ほぼ実用段階に達している。残響時間のほか、鳴き竜現象や音焦点の防止など、ホールの設計には多くの注意点があるとされる。たとえば文献[4]などを参照。

³³ たとえば文献[6]参照。音場のシミュレーション技術について解説されている。またBorkは、スウェーデンにあるELMIAホールについて音響測定を行い複数のシミュレーション結果と比較した結果、大規模な音場でさえ、波動性を無視したシミュレーションと実測値の間に（音楽で使用する）特定の音域で大きな隔たりがあると報告している。当時筆者の所属していた室内音響シミュレーションプロジェクト（連邦理工学研究所、ドイツ、ブラウンシュバイク市）において行われた実験。文献[7]参照。

5. おわりに

音楽が演奏される空間によって、楽器などの音質は大きく変化する。また同じ音場でも楽器、聴衆、マイクロフォンの位置などにも依存している。これは、空間の持つ性質によるものである。本稿では小規模な空間で問題となる、周波数軸上で離散的に存在する低次の固有モードの影響を簡単に可視化する手法についてのべた。比較的測定が簡易で精度の得られやすい実験モダル解析を用いて位置と周波数によって異なる音場の性質を示し、その応用の可能性を示した。

これによって演奏・録音をスタジオなどで行う場合に不可欠な、音場の性質を視覚的にとらえることができる。実際の演奏や収録を行う場合に極めて有効な指標として、楽器やマイクロフォンの位置を決定する際に応用し、また電気的に補正することが可能になると考えられる。

参考文献

- [1] Mori, T., Ein Vergleich der Qualitätsbestimmenden Faktoren von Klavier und Flügel, Wissenschaftsverlag, Aachen, 2000
- [2] Cremer, L., Müller, H.A., Raumakustik, Hirzel-Verlag, Stuttgart, 1978

- [3] Wogram, K., Anwendung der Modalanalyse bei Musikinstrumenten, Teil I, Instrumentenbau-Zeitschrift 45, 1991 p.44-48
- [4] 住宅の防音と調音のすべて、月刊建築技術別冊、通巻 449 号、建設省建築研究所監修
- [5] 森本政之、音楽ホールの主観評価、日本音響学会誌、57-1、p89、2001
- [6] 飯田一博、電気音響で役立つ音場の可視化技術、日本音響学会誌、56-7、p509-512、2000
- [7] Bork, L., A Comparison of Room Simulation Software – The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation, ACUSTICA united with acta acustica, Vol.86, p943-956, 2000